

Estado da arte da tecnologia em um sistema hidrogênio-solar-eólico

Elissandro M. do Sacramento
elimonsa@bol.com.br

Lutero C. de Lima
lutero@uece.br

Paulo C. Carvalho
carvalho@dee.ufc.br

Resumo

A sociedade do hidrogênio é um termo que vem ganhando notoriedade mundial. Isto se deve ao fato de que está cada vez mais dispendioso o processo de obtenção de combustíveis fósseis e que a queima desses combustíveis emite muitos poluentes à atmosfera, principalmente gases que intensificam o efeito estufa. Uma série de mudanças climáticas está relacionada diretamente com essas emissões, causando sérios danos à sobrevivência humana. O hidrogênio é classificado como o combustível do futuro, isto se deve ao fato de que sua queima não emite nenhum poluente à atmosfera. Uma opção bastante limpa para obtenção de hidrogênio é o devido aproveitamento de fontes renováveis de energia. Este artigo revisa as formas de produção, armazenamento, transporte e utilização do hidrogênio como um vetor energético, inserido num contexto de utilização de duas fontes renováveis, a solar e a eólica, para produção de hidrogênio eletrolítico.

Palavras-chave: *Hidrogênio, Energia solar, Energia eólica.*

Abstract

The hydrogen society is a term that have received world notoriety. This is due to increasing on costs to obtain fossil fuels and the emission of many pollutants to atmosphere, mainly greenhouse gases. A portion of climates changes is directly related with this emissions, causing serious damages on human survival. The hydrogen is called the future fuel, this is due its clean combustion, that no emission pollutants to atmosphere. A enough clean option to obtain hydrogen is the utilization of renewable sources. This article reviews the forms to production, storage, distribution and utilization of hydrogen like as energy carrier, inserted on context of utilization of two renewable sources, the solar and eolian, for production of electrolytic hydrogen.

Keywords: *Hydrogen, Solar Energy, Wind Energy.*

1 Introdução

A crescente demanda energética mundial, juntamente com a limitação na produção de petróleo, tem levado a uma busca por novas fontes alternativas de energia, como a solar, eólica, as PCH's (Pequenas Centrais Hidrelétricas) e a biomassa. Os custos para implantação de tecnologias para o devido aproveitamento dessas fontes ainda são altos, relativamente aos dos combustíveis fósseis, mas espera-se uma viabilidade destas em virtude dos aumentos dos preços da energia produzida a partir de insumos fósseis.

O nordeste brasileiro possui um elevado potencial para produção de energia a partir das fontes eólica e solar, isso comprovado por atlas eólicos e solarimétricos de alguns estados dessa região. Sabe-se, porém, que estas são fontes de energia intermitentes, ou seja, possuem uma variabilidade sazonal em suas saídas de energia. Assim, a necessidade para armazenamento de energia se faz necessária. Uma alternativa a esse problema seria a utilização do hidrogênio como um vetor energético, proporcionando um acúmulo de energia produzida em períodos de baixas demandas. Faz-se necessário ressaltar que o hidrogênio não é uma fonte de energia, ou seja, ele não é encontrado em minas ou jazidas, nem produzido, pelo menos em grandes quantidades, através de processos naturais espontâneos.

Conforme Sherif et al. 2005, o hidrogênio apresenta algumas características as quais o torna um vetor energético ideal, ou seja:

- o hidrogênio pode ser produzido e convertido em eletricidade numa eficiência relativamente alta;
- a matéria prima para a produção de hidrogênio é água, disponível em abundância;
- o hidrogênio pode ser armazenado nas formas líquida, gasosa ou sólida;
- pode ser transportado em longas distâncias pelo uso de gasodutos, navios-tanques ou em veículos ferroviários e rodoviários;
- o hidrogênio como vetor energético é compatível com o meio ambiente.



Figura 01: Representação do funcionamento básico da transformação de energia oriunda de fontes renováveis para hidrogênio e sua opção como combustível no setor de transportes (Fonte:FRANK, 2005).

Neste trabalho é feita uma revisão do estado da arte da tecnologia de produção do hidrogênio de origem solar e eólica, visando, com isto, uma avaliação das possíveis alternativas para o aproveitamento dos recursos energéticos solar e eólico do estado do Ceará, como o exemplo mostrado para o setor de transportes na Figura 01.

2 Tecnologias de produção do hidrogênio

A produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água é, em princípio, bem simples. Este é um processo no qual eletricidade é requerida para decompor a água em seus constituintes básicos, oxigênio e hidrogênio. Na eletrólise, dois eletrodos, sendo um carregado positivamente e o outro negativamente, são dispostos em uma solução de água com um eletrólito (solução iônica). Uma corrente DC é aplicada à célula eletrolítica, resultando na liberação de hidrogênio no cátodo (eletrodo carregado negativamente) e de oxigênio no ânodo (eletrodo carregado positivamente).

Fisicamente, os eletrolisadores consistem em pequenas células eletrolíticas conectadas entre si. Em relação à disposição dos eletrodos, os eletrolisadores podem ser classificados como unipolar (tipo tanque), em que os eletrodos estão conectados em paralelo, e o bipolar (tipo prensa), em que os eletrodos estão conectados em série. A célula tipo tanque é mais simples, resistente e, pelas suas características físicas, é mais fácil de ser isolada para manutenção. Todavia, ela requer elevados níveis de corrente e baixos níveis de tensão, elevando os custos com materiais para o processo de retificação do sinal de corrente (Prince-Richard, 1996). A célula tipo prensa é mais compacta, diminuindo assim o caminho a ser percorrido pela corrente elétrica em fios e eletrodos, reduzindo as perdas devido à resistência ôhmica interna do eletrólito, incrementando a eficiência do eletrolisador, podendo este trabalhar com elevadas densidades de corrente, temperaturas e pressões. Há algumas desvantagens dessas células, como o surgimento de correntes parasitas que podem causar problemas de corrosão, além dos custos de fabricação elevados devido à sua “compactância”, resultando em altas pressões de trabalho (Ulleberg, 1998). Na célula unipolar os eletrodos encontram-se separados a uma certa distância um do outro. No bipolar, os eletrodos encontram-se separados apenas por um isolador, ou seja, eletrodo positivo de um lado e o outro negativo do outro. Dependendo da utilização, pode-se escolher dentre os dois tipos básicos.

Como a água é um condutor iônico muito pobre, ela necessita de uma outra substância para aumentar sua condutividade. Assim, na eletrólise alcalina, o eletrólito utilizado é o hidróxido de potássio (KOH), numa concentração de 25-30%wt, em virtude da sua boa condutividade e uma notável resistência à corrosão do ferro inoxidável nessa concentração, material esse utilizado na fabricação de eletrolisadores (Prince-Richard, 1996). Esses tipos de eletrolisadores operam numa faixa de temperatura de 70-100°C, sob pressão de 1-30 bar. Átomos de hidrogênio juntam-se em pares na superfície do cátodo para

formar moléculas de hidrogênio, as quais deixam o eletrodo sob a forma de gás. Na ocorrência da eletrólise alcalina da água, íons OH^- migram continuamente do cátodo para o ânodo. Para que não ocorra uma eventual mistura entre moléculas de oxigênio e hidrogênio, uma membrana permeável (ou diafragma) à passagem de íons é colocada entre as câmaras que contêm os eletrodos. Revestimentos catalíticos são aplicados às superfícies dos eletrodos. Sem esses revestimentos catalíticos, a concentração de átomos de hidrogênio sobre os eletrodos poderia aumentar, reduzindo assim o fluxo de corrente, diminuindo a produção de gás hidrogênio. Esses revestimentos aumentam a cinética de reação nos eletrodos, diminuindo assim as probabilidades de ocorrência de sobretensões nas células.

Membranas poliméricas sólidas podem ser utilizadas como eletrólitos em alguns tipos de eletrolisadores. São utilizadas membranas ácidas que possuem uma alta condutividade à prótons e uma muito baixa condutividade eletrônica, ou seja, ela é permeável à passagem de prótons e não permite a passagem de elétrons. A membrana que constitui o eletrólito é composta de teflon sulfurizado com ácido sulfônico (HSO_3). Este HSO_3 é uma substância hidrofílica; ocasiona uma hidratação da membrana e um acúmulo de íons H^+ . Esses íons atravessam a membrana, já que esta é permeável à passagem de prótons, e carregam consigo moléculas de água, originando os íons H_3O^+ . Os eletrodos são constituídos de carbono e platina (a qual exerce a função catalisadora), estando presos à membrana eletrólita. A quantidade de platina a ser utilizada, tanto no ânodo quanto no cátodo, está diminuindo com o passar do tempo, pois novas tecnologias desenvolvidas na área de células poliméricas têm proporcionado essa redução. Apesar de possuírem custos mais elevados, eletrolisadores poliméricos trabalham com maiores densidades de correntes em relação aos eletrolisadores alcalinos. Assim, uma área menor será requerida para uma mesma razão de produção de hidrogênio em uma eficiência relativamente alta. Os eletrolisadores poliméricos também trabalham a pressões mais elevadas.

Alguns tipos de eletrolisadores trabalham a temperaturas bem mais elevadas do que os eletrolisadores alcalinos e os poliméricos. Estes são constituídos por um eletrólito de material cerâmico permeável a íons oxigênio. Essa alta temperatura é requerida para que a cerâmica ofereça uma boa condutividade iônica. Os íons oxigênio dirigem-se do cátodo para o ânodo por meio da membrana, fazendo com que os elétrons movimentem-se através de um circuito externo em sentido contrário. O eletrólito cerâmico também age como um separador de gás. Água sob a forma de vapor alimenta a câmara que contém o cátodo, suas moléculas juntam-se aos elétrons contidos nessa região, formando íons oxigênio e hidrogênio. Os íons oxigênio passarão por meio do eletrólito cerâmico, já que este é permeável a esses íons, em direção à câmara que contém o ânodo, onde liberarão elétrons e juntarão a um outro átomo para formar uma molécula de oxigênio.

Sistemas fotoquímicos são aqueles em que a luz solar é absorvida por moléculas isoladas em solução. Estes podem ser utilizados para produzir hidrogênio. Para que a reação de separação da água em moléculas de hidrogênio e oxigênio ocorra, é necessária uma dada quantidade de energia. Como a água absorve radiação solar apenas referente ao infravermelho, esta se torna insuficiente para estimular a reação. Assim, alguns elementos são adicionados ao sistema, os chamados sensibilizadores, que podem ser uma molécula ou um semicondutor, os quais possam absorver radiação solar e estimular a ocorrência de reações que gerem hidrogênio e oxigênio a partir da água (Bolton, 1996). Porém esses processos de produção fotoquímica de hidrogênio possuem rendimentos muito baixos, menores que 10%. Estes sistemas possuem algumas desvantagens, como uma eficiência quântica para reações de fotodegradações, que destroem o fotosensibilizador, menores do que 10^{-6} , sendo uma característica bem severa; ocorrência de reações colaterais degradativas; custos adicionais para separar os gases hidrogênio e oxigênio produzidos (Bolton, 1996).

Na produção fotoeletroquímica de hidrogênio, células eletroquímicas são utilizadas para produção de hidrogênio. Os rendimentos destes tipos de células são mais baixos do que os das células fotovoltaicas. Porém, as mesmas não utilizam uma junção semicondutor/semicondutor, mas uma junção é formada espontaneamente em uma interface semicondutor/eletrólito. As desvantagens das células fotoeletroquímicas, em relação às fotovoltaicas, são seus menores rendimentos em relação a estas últimas e uma eventual exibição de fotocorrosão, causando uma degradação dos fotoeletrodos ativos (Bolton, 1996).

A produção fotobiológica de hidrogênio é uma alternativa desenvolvida em laboratórios. Há três métodos básicos para produção de hidrogênio a partir de processos biológicos, que são através da fotossíntese (o qual utiliza algas verdes e cianobactérias, na fotólise, e as bactérias fotossintetizantes, na fotodecomposição de compostos orgânicos), através da fermentação (fermentação de compostos orgânicos) e por meio de sistemas híbridos (bactérias fermentativas, juntamente com as fotossintetizantes) (Bolton, 1996). As bactérias fermentativas degradam substratos orgânicos e liberam moléculas de dióxido de carbono e de hidrogênio durante o processo fermentativo. Elas utilizam-se de enzimas como a nitrogenase, a Fe-hidrogenase e a NiFe hidrogenase para catalização das reações químicas durante a produção de hidrogênio. As reações químicas que geram hidrogênio ocorrem como forma de dissipar elétrons contidos nas células e também para que haja um incremento na energia para o metabolismo celular (Benemann, 2000). Os processos de fotossíntese de plantas e algas

resultam na quebra da molécula de água para produção de carboidratos ou hidrogênio. Nas plantas verdes somente ocorre redução de dióxido de carbono, pois elas são desprovidas da enzima hidrogenase, a qual é responsável pela produção de hidrogênio. Porém, as microalgas, tanto as eucariontes quanto as procariontes possuem essas enzimas, produzindo, em sua fotossíntese, sob certas condições, hidrogênio.

Há dois tipos básicos de fotólise: a biofotólise direta e a indireta. Na direta, ocorre formação de hidrogênio com um agravante, que é a sensibilidade da enzima hidrogenase e da reação de biofotólise direta ao oxigênio. Como há, naturalmente como produto das reações, liberação de oxigênio, isso pode causar uma inibição à formação de hidrogênio. Assim, estudos na direção de como superar essa sensibilidade ao oxigênio tem ganhado interesse por parte de alguns cientistas. As cianobactérias produzem hidrogênio e oxigênio através da biofotólise indireta da água. Neste processo, três enzimas são utilizadas, que são a nitrogenase, a hidrogenase de assimilação e a hidrogenase bidirecional. A nitrogenase e a hidrogenase bidirecional são muito sensíveis ao oxigênio, comprometendo assim a produção de hidrogênio (Benemann, 2000). A eficiência de conversão da energia solar em energia química, na prática, por alguns seres clorofilados, como a grande maioria das espécies vegetais, seria de 1%. No entanto, alguns organismos fotossintéticos, como as microalgas, podem armazenar, sob a forma de energia química, 22% da energia solar que sobre elas incidem (Bolton, 1996). Os custos para produção de hidrogênio biológico foram estimados como sendo o dobro daqueles se o hidrogênio fosse produzido por meio de eletrólise utilizando células fotovoltaicas. O rendimento máximo atingido para produção de hidrogênio biológico foi da ordem de 10% , menor que os 13% para o processo de eletrólise com células fotovoltaicas (Bolton, 1996).

A produção de hidrogênio a partir da gaseificação de carvão representa 18% da produção total deste produto no mundo (Doctor and Molburg, 2004). Os vários tipos de carvão podem reagir com alguns elementos, tais como o oxigênio e o hidrogênio, e produzir certas misturas compostas por monóxidos de carbono, dióxidos de carbono, hidrogênio e metano, sendo, assim, um método para obtenção de hidrogênio. Neste método, inicialmente carvão é transformado em uma pasta fluida pelo trituração do mesmo em um pó fino e misturado com água. Então esta pasta fluida é gaseificada com oxigênio puro. O gás formado é então resfriado, misturado à água para remoção de cinzas, antes de passar pelos ciclos de obtenção do hidrogênio (Yüzügüllü, 2005). Para a obtenção do produto final, hidrogênio, várias reações intermediárias são processadas. A complexidade deste processo está relacionada com o desconhecimento de parte destas reações. As várias reações dependerão diretamente do reagente injetado junto ao carvão, que influenciará a composição do gás resultante. Como este estudo focaliza-se no hidrogênio como produto final, é interessante que o processo de gaseificação apresente um alto teor deste gás, atentando-se sempre aos custos e à operacionalidade destes sistemas. Uma peça fundamental neste processo é o gaseificador, que será escolhido de acordo com o percentual de hidrogênio contido no gás resultante, os gases produzidos e os tipos de carvão a serem utilizados. A gaseificação do carvão representa custos maiores do que a reforma-vapor do metano (Veziroglu and Barbier, 1998). Este processo consiste em submeter o hidrocarboneto vaporizado a altas temperaturas, utilizando assim calor para separar átomos de hidrogênio do átomo de carbono no metano. Superfícies catalíticas, como níquel e platina são utilizadas nas reações. A reforma do gás natural é uma das formas mais utilizadas hoje para obtenção de hidrogênio. Como a reforma-vapor transforma moléculas estáveis em reativas, este é um processo endotérmico, com uma $\Delta H = 225,4$ kJ/mol (Rydén and Lyngfelt, 2006).

Sistemas para reforma-vapor de gás natural modernos possuem tubulações de gás natural seguidas por um reator e um equipamento PSA (Pressure Swing Adsorption) onde ocorrerá a purificação do produto final (hidrogênio). As tubulações para reforma-vapor encontram-se no interior de fornalhas, por meio das quais calor será fornecido para que o processo ocorra. Então, serão esperadas elevadas tensões térmicas sobre o material dos tubos. Esse é um fator bastante relevante quando da escolha do tipo de material para compor as tubulações. Normalmente, são feitas de tubos de ferro, tendo catalisadores em seu interior, com diâmetros na faixa de 70-160 mm, com espessuras de 10-20 mm (Rydén and Lyngfelt, 2006). Após a reação de substituição, um sistema PSA é utilizado para devida purificação do produto final. Tem-se obtido um grau de pureza para o hidrogênio em torno de 99,9%. As desvantagens deste processo são a poluição gerada, pois dióxido de carbono é emitido à atmosfera, e os elevados custos da energia produzida a partir do hidrogênio gerado em comparação à que seria obtida a partir da queima direta do metano. Este é um meio bastante utilizado devido aos seus baixos custos relativos em relação a outros.

3 Armazenamento de hidrogênio

O gás hidrogênio possui baixa densidade volumétrica. Sendo assim, todos os processos para o seu armazenamento implica em reduzir seu volume ocupado por unidade de massa. Desta maneira, pode-se aumentar a densidade volumétrica

do hidrogênio por meio de três processos, que são: a realização de trabalho sobre o próprio gás, com a finalidade de comprimi-lo; redução de sua temperatura a uma abaixo da crítica; e, por fim, a redução da repulsão intermolecular pela adição de um outro material ao hidrogênio (Züttel, 2004).

Análises de duas variáveis são importantíssimas, quando o armazenamento de hidrogênio é estudado. São elas a densidade de energia volumétrica, que é a relação entre a quantidade de energia disponível (E) por unidade de volume (V), e a densidade de energia gravimétrica, que é a quantidade de energia disponível (E) por unidade de massa do sistema (m). O hidrogênio sob a forma de vapor pode ser armazenado em gasômetros, cilindros, gasodutos e em locais subterrâneos.

Gasômetros são reservatórios para gás que contém volume variável. Sua estrutura interna é composta por dois cilindros, um menor e outro maior, de forma que quando há entrada de gás no mesmo, seu volume interno aumenta; do contrário, na saída de gás, seu volume interno diminui. Há um fluido disposto entre os cilindros de forma que o confinamento total do gás está assegurado dentro do gasômetro (Da Silva, 1991). A utilização de gasômetros se dá quando da necessidade de armazenamento em grandes quantidades, sendo muito utilizado em refinarias.

Para o caso da utilização de cilindros, o hidrogênio armazenado é previamente pressurizado por um compressor (valores que podem chegar até a aproximadamente 200 atm), resultando numa maior densidade de energia volumétrica armazenada. A densidade de energia gravimétrica, para armazenamento em cilindros de alta pressão, sofrerá uma redução, quando do incremento da mesma. Isto é expresso na equação (Züttel, 2004):

$$(e/d) = (\Delta p / (2\sigma + \Delta p)) \quad (1)$$

onde e - espessura da parede do cilindro; d - diâmetro externo do cilindro; Δp - variação na pressão interna do gás; σ - dureza do material. Assim, um aumento desejado na densidade de energia volumétrica implica uma redução na densidade de energia gravimétrica. Uma desvantagem da utilização deste equipamento é o uso de um compressor, o qual consumirá parte da energia total estocada.

Os gasodutos têm como função principal transportar hidrogênio de um local a outro. Porém, quando o ponto consumidor não solicitar hidrogênio, este se encontrará armazenado no interior destes dutos, ressaltando que o hidrogênio é previamente pressurizado antes de entrar nos dutos. As desvantagens da utilização de gasodutos estão nas probabilidades de vazamentos nas juntas e uniões, bem como a utilização de compressores para pressurizar o hidrogênio. Problemas relacionados com o desgaste podem ocorrer com o material da tubulação, se não houver uma atenção especial com os níveis de pressão e temperatura do hidrogênio.

Outro método utilizado é o armazenamento de grandes quantidades de hidrogênio em minas de sal, ou aquelas construídas pelo homem, cavernas e aquíferos. Este é um tipo não muito comum para armazenamento de hidrogênio, visto que depende muito das condições geográficas de cada região. Alguns procedimentos devem ser tomados para reduzir perdas de gás, já que o hidrogênio tem um alto coeficiente de difusibilidade. No caso de armazenamento de hidrogênio em cavernas, pressões variando numa faixa de 80 a 160 bar são encontradas. A densidade volumétrica de energia varia de 250 a 465 kWh/m³. As perdas referentes à vazamentos em cavernas e minas giram em torno de 1 a 3% do volume total de hidrogênio por ano (Sherif et al., 2005).

O hidrogênio somente é encontrado na forma líquida em temperaturas abaixo de sua temperatura crítica, aproximadamente 33K (-243°C), sob pressão ambiente. Normalmente o hidrogênio líquido é armazenado em temperatura da ordem de 21,2K. A densidade do hidrogênio líquido é de 70,8 kg/m³ (Züttel, 2004). Em relação às direções dos spins dos elétrons e núcleos de uma molécula de hidrogênio, podemos classificar o mesmo em para-hidrogênio ou orto-hidrogênio. O hidrogênio normal, em temperatura ambiente, é constituído de 25% da forma para- e 75% da forma orto-hidrogênio. Estas formas possuem uma suave diferença em seus níveis energéticos, resultando em diferentes propriedades físicas. Para liquefazer o gás hidrogênio, é necessária a passagem de orto-hidrogênio a para-hidrogênio. A reação de conversão orto-para- é exotérmica, em que o calor liberado é maior do que o próprio calor de vaporização. Sendo assim, um catalisador, normalmente o óxido de ferro hidratado, é utilizado para acelerar a conversão orto-para, de modo a evitar a evaporação de parte da massa de hidrogênio. A liquefação é realizada através do ciclo de Joule-Thompson. Este consiste inicialmente na compressão do gás por meio de um compressor, seguido de resfriamento num trocador de calor, para finalmente sofrer uma expansão isentálpica, produzindo hidrogênio nos estados líquido e gasoso. A parte líquida é retirada do sistema, porém a parte gasosa retorna para reiniciar todo o processo novamente (Da Silva, 1991). É de fundamental importância o conhecimento do fato de que o gás somente sofrerá uma expansão seguida de resfriamento, se as variáveis de estado pressão e temperatura possuírem valores iniciais abaixo de seu ponto de inversão, este representado pelos valores de máximo de cada curva característica num gráfico pressão x temperatura. Em relação ao hidrogênio, como sua temperatura

de inversão é menor do que a temperatura ambiente, é necessário resfriá-lo antes que ele entre na válvula de expansão (Da Silva, 1991). Os grandes desafios para a tecnologia do armazenamento de hidrogênio líquido estão associados à eficiência energética do processo de liquefação e ao isolamento térmico dos vasos armazenadores.

Hidretos metálicos são compostos que possuem forma AH_x , onde A é um metal ou uma de suas ligas; H é o átomo de hidrogênio e x a quantidade de átomos de hidrogênio por fórmula. Os hidretos serão considerados armazenadores de hidrogênio quando, pela sua dissociação devido a algum processo, liberarem hidrogênio. Como a natureza apresenta alguns tipos de metais, podemos classificar os melhores compostos destes armazenadores de hidrogênio pelas características seguintes (Da Silva, 1991):

- O hidreto metálico deverá apresentar um calor de formação menor do que zero, ou seja, deverá ser formado a partir de um processo exotérmico. Desta maneira, hidrogênio será liberado quando calor for cedido ao sistema. Porém esse calor de formação não deverá ser muito menor do que zero;

- É desejável que todo ou quase todo o hidrogênio armazenado seja recuperado na dissociação do hidreto. Desta forma, devem ser utilizados hidretos que não possuam um calor de formação muito menor do que zero, ou seja, muito estáveis, de modo a não dificultar a reversibilidade da reação de formação do hidreto metálico;

- Que o composto hidreto metálico possua uma alta densidade volumétrica de hidrogênio armazenada;

- Possuam elevadas cinéticas de reação de formação e dissociação, visto que é necessário o fornecimento quase que imediato de hidrogênio nas várias aplicações;

- Baixos custos para sua formação e dissociação;

- Hidretos que possuam baixas densidades volumétricas, mas com elevadas densidades energéticas.

Este processo de armazenamento de hidrogênio possui uma característica que o destaca em relação aos demais, sua elevada densidade volumétrica de átomos de hidrogênio presentes no material hospedeiro. Razões hidrogênio/metal têm sido encontradas em até 2 para hidretos metálicos (Züttel, 2004). A maior densidade volumétrica de átomos de hidrogênio encontrada até hoje foi de 150 kg/m^3 , encontrada nos compostos Mg_2FeH_6 e $Al(BH_4)_3$. Estes são conhecidos como hidretos complexos, os quais diferem estruturalmente dos hidretos metálicos. Estes hidretos complexos podem atingir razões hidrogênio/metal maiores do que 2. A grande desvantagem destes tipos de hidretos é a sua estabilidade. Para que ocorra sua decomposição, é necessário temperaturas elevadas (Züttel, 2004). A utilização de hidretos metálicos para armazenamento de hidrogênio em larga escala é uma escolha segura e compacta. A grande desvantagem é a baixa densidade gravimétrica destes tipos de sistemas. Sendo assim, desafios futuros rumam neste caminho.

O processo de fisissorção ou adsorção física do hidrogênio ocorre como consequência da interação entre moléculas de hidrogênio gasoso, chamado adsorbato, com moléculas de um sólido, o adsorvente. As moléculas de hidrogênio são atraídas por um campo de forças existente na superfície do sólido. Essas interações envolvidas no processo são as forças de Van der Waals. Na adsorção física, a interação entre as moléculas do adsorbato e as do adsorvente é composta por um termo atrativo, o qual diminui com a distância numa potência de -6, e um outro repulsivo, que diminui com a distância numa potência de -12 (Züttel, 2004). A energia mínima apresentada no equilíbrio entre os processos de atração e repulsão das moléculas de hidrogênio pela superfície sólida foi de 1-10 kJ/mol de H. Desta forma, devido à fraca interação, hidrogênio é liberado com o aumento da temperatura e o processo de adsorção física somente ocorrerá em baixas temperaturas, menores do que 0°C . Esta é uma forma de armazenamento de hidrogênio bem promissora quando do ponto de vista de densidade gravimétrica de hidrogênio. Segundo R. Ströbel et al. (2006), um valor máximo de capacidade de armazenamento de hidrogênio adsorvido em grafite encontrado foi da ordem de $0,03 \text{ kg H}_2/\text{Kg}$ de substrato, para uma área de superfície de $1315 \text{ m}^2/\text{g}$. Porém, este valor somente pôde ser atingido em temperaturas muito baixas. O DOE (US Department of Energy) estima que, para o ano de 2010, teremos avançado tecnologicamente o suficiente para atingirmos a meta de $0,06 \text{ kg H}_2/\text{Kg}$ de substrato. Materiais que têm sido evidenciados como promissores a essa meta são os nanomateriais de carbono. Muitos pesquisadores têm sido atraídos para esta área após um paper escrito por Dillon et al. (1997), no qual os autores descrevem resultados para dessorção de hidrogênio a partir de nanotubos de carbonos. As vantagens da utilização deste processo estão relacionadas com as baixas pressões de operação, baixos custos dos materiais envolvidos e a simplicidade do sistema de armazenamento. Porém, as baixas razões ($\text{kg de hidrogênio armazenado}/\text{kg de substrato}$) e as baixas temperaturas requeridas são obstáculos a serem superados no estudo desta tecnologia.

4 Transporte de hidrogênio

O transporte de hidrogênio gasoso poderá ocorrer sob duas formas usuais, com a utilização de gasodutos ou com a utilização de tanques armazenadores em caminhões. A utilização desta última forma citada proporciona um inconveniente,

sendo os elevados custos de produção de energia em potencial devido à baixa densidade volumétrica do hidrogênio. Outro problema envolve o gasto de energia para alimentar compressores, a fim de pressurizar o hidrogênio nos tanques para transporte. O transporte de hidrogênio por tanques ocorre sob pressões tipicamente de 150-200 atm (Da Silva, 1991). Os gasodutos são bastante utilizados no mundo, principalmente em países que fazem uso do gás natural em larga escala. Para o emprego destes no transporte e distribuição de hidrogênio, é necessário que seu material constituinte não seja à base de titânio ou alumínio, pois estes reagem muito facilmente com o hidrogênio, produzindo a deterioração do material, causando sérios problemas de vazamentos. A transmissão de hidrogênio por meio de gasodutos requer algumas considerações, que são maiores diâmetros das tubulações e maiores potências de compressão do que para sistemas a gás natural (Sherif et al., 2005). Em relação aos custos de transporte de hidrogênio utilizando gasodutos, foi estimado que giram em torno de 1,5-1,8 vezes maiores do que aqueles para transmissão de gás natural (Sherif et al., 2005). Porém, sabe-se que a transmissão de energia por meio de hidrogênio é menos dispendiosa, em situações de grandes distâncias (acima de 1000 km), do que sua transmissão por meio de eletricidade. Um outra opção seria o transporte de hidrogênio líquido. Esta alternativa está associada ao aumento de densidade volumétrica de energia a ser transportada, pois a densidade volumétrica do hidrogênio no estado líquido é bem superior em comparação à verificada em seu estado gasoso. Porém, alguns inconvenientes estão associados a esta opção, que são os elevados custos dos recipientes para armazenar o hidrogênio líquido, a considerável quantidade de energia gasta durante o processo de condensação do hidrogênio e, por fim, a perda de gás devido à evaporação, em torno de 0,5-1% ao dia (Da Silva, 1991).

5 Hidrogênio seguro

A natureza do hidrogênio faz com que alguns cuidados sejam necessários em sua manipulação. A molécula de hidrogênio é diatômica em seu estado natural, ou seja, muito pequena. Isto faz com que esta tenha muita facilidade em escapar por meio de pequenos furos ou em junções nas tubulações usadas para seu transporte. Baseado em algumas propriedades, tais como densidade e coeficiente de difusão no ar, o hidrogênio escapa 1,26 - 2,8 vezes mais rapidamente por meio de um furo do que o gás natural (S. A. Sheriff et al., 2005). O hidrogênio possui uma energia de ignição extremamente baixa, da ordem de 0,02 mJ. Porém para que o mesmo acenda, é necessário uma razão combustível/ar adequada, numa faixa de 25-30% (Swain and Swain, 1992). Sua inflamabilidade com o ar está numa faixa de 4,1 - 75% do volume de ar, enquanto que para a gasolina está entre 1 - 7,8% do volume de ar. O hidrogênio pode reagir com muitos materiais metálicos e causar eventuais falhas nestes, ocorrendo até, em casos extremos, a ruptura dos mesmos. Esta é uma reação que ocorre principalmente em ligas de aço com alta dureza e com o alumínio. Algumas características físicas do hidrogênio elevam os riscos de sua utilização. Em seu estado natural, o hidrogênio é inodoro. A chama deste é bastante clara à luz solar. Porém, para que esse problema da ausência de visibilidade de sua chama seja resolvido, alguns produtos químicos de efeito corante já são utilizados. Acredita-se que, com o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente na área de sensoriamento, os riscos devido a essas características físicas do hidrogênio venham a ser reduzidos. A expansão da utilização de sistemas a hidrogênio perpassa pelo desenvolvimento de uma legislação clara e segura. Em alguns estados norte-americanos, o hidrogênio é tido como um produto anormalmente perigoso, classificação dada àqueles em que os riscos de seu manejo não podem ser eliminados com razoável prudência (S. Murray, 2003). Os riscos calculados por algumas companhias seguradoras, nos EUA, inviabilizam a prestação de seus serviços nessa área. Porém, há outras empresas seguradoras que já se propõem a trabalhar com sistemas à hidrogênio. Mas estas últimas afirmam que é necessário criar códigos de segurança e padrões de comportamento para que o devido estabelecimento de uma infra-estrutura do hidrogênio venha a emergir (S. Murray, 2003). Na ocorrência de um acidente, a energia de explosão por unidade de energia armazenada pelo hidrogênio é muito baixa. Para um dado volume, o hidrogênio possuiria 22 vezes menos energia explosiva do que o mesmo volume ocupado com vapor de gasolina (S. A. Sheriff et al., 2005).

O hidrogênio líquido possui relevantes características quando a segurança é evidenciada. O mesmo apresenta uma maior volatilidade em relação à gasolina, sendo uma interessante propriedade quando da ocorrência de vazamentos.

6 Equipamentos para utilização do hidrogênio

Máquinas de combustão interna a hidrogênio são bem eficientes. Possuem em torno de 20% maiores eficiências do que máquinas a gasolina (Barbir, 1999). Isto se deve ao fato das elevadas razão de compressão e razão de calor específico em relação aos outros combustíveis. A maior vantagem da utilização do hidrogênio nessas máquinas é o produto da sua combustão: vapor d'água e pequenas quantidades de NO_x. As emissões de NO_x por máquinas de combustão

interna a hidrogênio são uma ordem de magnitude menores do que aquelas para combustão a gasolina (Barbir, 1999). Pequenas quantidades de CO, CO₂ e hidrocarbonetos são descarregadas devido à utilização de óleos lubrificantes. Devido à sua extensa faixa de inflamabilidade, hidrogênio pode ser queimado numa larga faixa de mistura hidrogênio/ar em máquinas de combustão interna. Isto traz como conseqüência a possibilidade de ocorrência da queima de uma mistura escassa, a qual é aquela em que a quantidade de ar é maior do que para a quantidade estequiométrica, havendo uma maior quantidade de oxigênio. Porém, este tipo de mistura acarreta maior emissão de NO_x para a atmosfera. Como o hidrogênio possui baixa densidade de energia volumétrica, em relação a outros combustíveis, há uma perda da potência de saída da máquina. Uma mistura estequiométrica gasolina/ar ocupa 2% do volume do cilindro na máquina, enquanto que uma mistura estequiométrica hidrogênio/ar ocupa 30%. Desta maneira, a energia da mistura hidrogênio/ar é somente 85% desta, resultando numa perda de potência em 15% (Barbir, 1999). Então, a máquina funcionando a hidrogênio terá 15% de perda de potência quando comparada utilizando gasolina como combustível. Porém, com tecnologias avançadas na área de injeção de combustíveis, podem-se reduzir estas perdas. O hidrogênio possui uma baixa energia de ignição. Sabe-se que a energia necessária para que o hidrogênio inflame é uma ordem de magnitude menor do que a solicitada pela gasolina. Isto viria a ser um problema em casos de pontos quentes nos cilindros, o que poderia ocasionar um acendimento indesejável no sistema. O hidrogênio possui alta temperatura de auto-ignição. Esta elevada temperatura de auto-ignição do hidrogênio permite maiores razões de compressão utilizadas do que para outros combustíveis. Como a eficiência térmica de uma máquina a combustão interna está diretamente ligada com a razão de compressão, quanto maior for esta última, maiores eficiências térmicas serão obtidas.

Um dispositivo, hoje com algumas utilizações práticas, que executa a ação de produzir eletricidade e água a partir de hidrogênio e oxigênio é a célula combustível. Esta consiste num arranjo composto por dois eletrodos porosos, o anodo (eletrodo negativo) e o catodo (eletrodo positivo), revestidos com um catalisador, normalmente platina, em contato com um eletrólito. O anodo é alimentado com hidrogênio e o catodo é alimentado com oxigênio. Reações químicas ocorrerão nos eletrodos, produzindo uma corrente elétrica. Um catalisador de platina, aplicado aos eletrodos, trata da separação dos íons, hidrogênio no anodo, e oxigênio no catodo. Os íons passam por meio de uma membrana, normalmente localizada ao centro da célula, produzindo eletricidade e água, a qual será expelida sob a forma de vapor. Em condições normais, 25°C e pressão atmosférica, o potencial reversível nas reações eletroquímicas ocorrentes nas células é de 1,229V. A tensão operacional de uma célula combustível é sempre inferior ao potencial reversível, devido a várias perdas, como as causadas por concentrações de íons nas proximidades dos eletrodos e a resistência ôhmica do circuito elétrico por onde os íons fluem. A eficiência de uma célula combustível é uma função da tensão da célula. A eficiência teórica de uma célula combustível é dada por

$$\eta = \Delta G^\circ / \Delta H \quad (2)$$

onde ΔG° representa a variação na energia livre de Gibbs e ΔH a variação de entalpia da reação ou o valor térmico do hidrogênio, superior ou inferior (Barbir, 1999). Níveis elevados de eficiência, deste modo, são alcançadas; da ordem de 80 - 90%. Porém, como dito anteriormente, a tensão de operação de uma célula combustível é sempre inferior ao potencial reversível. Sendo assim, a eficiência de uma célula combustível (η_R) será sempre inferior à teórica, e dada por (Barbir, 1999)

$$\eta_R = \eta_T \cdot \eta_V \cdot \eta_F \cdot \eta_U \quad (3)$$

onde η_T - eficiência térmica, a qual é a relação entre a energia livre de Gibbs para a reação e o valor térmico do combustível, $\Delta G^\circ / \Delta H$; η_V - eficiência voltaica, expressa pela relação entre a tensão de operação da célula e a tensão termodinâmica, V/E ; η_F - eficiência de Faraday, sendo a relação entre a corrente de funcionamento da célula e a corrente correspondente à razão na qual as espécies reagentes são consumidas, ou seja, I/nFm , onde m é a razão na qual os reagentes são consumidos; η_U - eficiência de utilização do combustível, definidas pela relação entre a quantidade de combustível consumido na reação eletroquímica e a quantidade de combustível que é suprida a célula.

Tabela 01: Principais Tecnologias desenvolvidas de Células combustíveis e suas diferenças (Ricardo Aldabó Lopez).

Denominação	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	ITSOFC	TSOFC
Eletrólito	Membrana polimérica	Hidróxido de Potássio	ácido fosfórico	Mistura de carbonatos	cerâmico	cerâmico
Temp. de operação(°C)	80	65-220	200	650	600-800	800-1000
Portador de carga	H	OH ⁻	H	CO ₃ ⁼	O ⁼	O ⁼
Invólucro da célula	carbono	Carbono	grafite	aço	cerâmico	cerâmico
Controle da água	evaporativo	Evaporativo	evaporativo	gasoso	gasoso	gasoso
Controle do Calor	gás e resfriamento independente	gás e Eletrólito	gás e resfriamento independente	gás e correção interna	gás e correção interna	gás e correção interna
Catalisador	platina	Platina	platina	níquel	C0-ZrO2 ou Ni-ZrO2	C0-ZrO2 ou Ni-ZrO3

Onde, PEMFC - Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell; AFC - Alkaline Fuel Cell; PAFC - Phosphoric Acid Fuel Cell; MCFC - Molten Carbonate Fuel Cell; ITSOFC - Intermediate Temperature Solid Oxide; TSOFC - Tubular Solid Oxide Fuel Cell. Alguns tipos de células combustíveis, como as alcalinas, tiveram sua utilização iniciada desde os anos 60 em programas espaciais. Outras, como aquelas a ácido fosfórico, já se encontram atualmente, disponíveis para comercialização, em aplicações de geração de eletricidade. As células PEM fazem parte de projetos em desenvolvimento relacionados a veículos automotores. Outros tipos estão sendo estudados para determinados fins. A Figura 02 representa o funcionamento de uma célula tipo PEM.

O atual contexto da matriz energética brasileira exige investimentos em novas fontes de energia. A tecnologia das células combustíveis ainda possui custos relativamente elevados, mas é uma opção viável para devido aproveitamento energético num futuro próximo. Alguns países já utilizam sistemas à células combustíveis para geração de energia elétrica e para outros fins, como alimentação energética de um veículo automotor. Sendo assim, é interessante que o Brasil participe dessa fase pioneira em direção à independência de combustíveis fósseis, investindo em outras tecnologias alternativas.

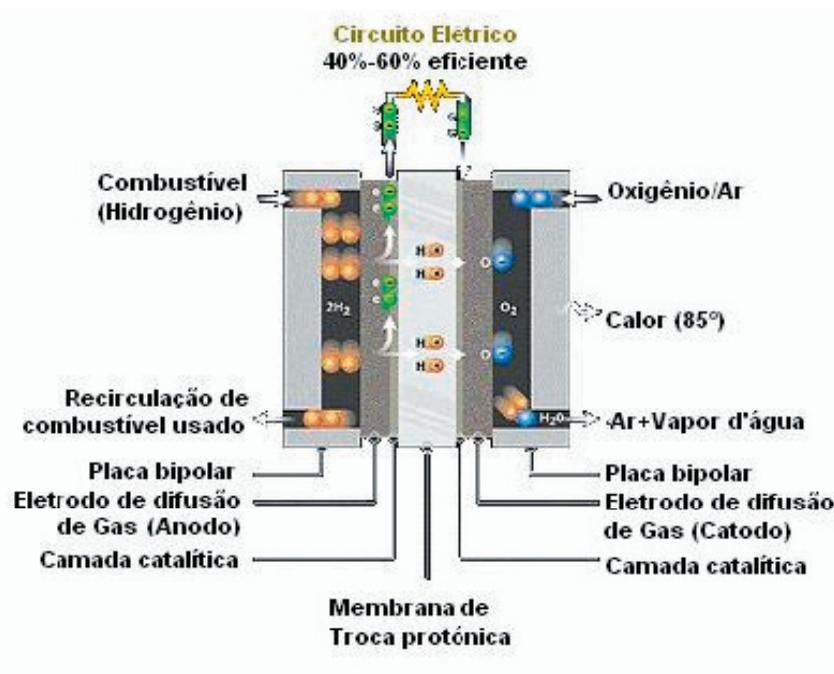


Figura 02: Esquema do funcionamento de uma célula tipo PEM (Fonte: Brandao, 2004)

7 Sistema híbrido eólico-solar-hidrogênio

O hidrogênio produzido a partir de fontes solares e eólicas é denominado limpo. Os custos para implantação de sistemas híbridos envolvendo essas fontes alternativas de energia são ainda elevados. Porém há uma necessidade de redução de poluentes na atmosfera devido à queima de determinados combustíveis. Desta forma, justificam-se investimentos no desenvolvimento de novas tecnologias alternativas, como a fotovoltaica e a eólica.

As células fotovoltaicas consistem, basicamente, na junção de duas placas de material semicondutor. Uma chamada tipo-n sofrerá dopagem com fósforo, resultando assim num excesso de elétrons nesse material. A outra, chamada tipo-p, dopada com boro, contém um déficit de elétrons, na qual surgirão lacunas ou sítios desocupados. Os fótons incidem na junção dessas placas, ocasionando num movimento de elétrons. A tecnologia em células fotovoltaicas tem-se desenvolvido consideravelmente. As células solares inicialmente fabricadas com silício, classificadas como de primeira geração, possuem eficiências que variam numa faixa de 8 a 15%. Uma segunda geração, baseada no desenvolvimento de filmes delgados os quais são depositados sobre um suporte de vidro ou de uma outra matéria sintética, tem sua utilização na fabricação de alguns elementos eletrônicos, tais como calculadoras e relógios. Estes filmes são compostos por um material amorfo à base de silício (Green, 2004). Esta tecnologia permite uma redução considerável de material semicondutor no produto acabado, porém a eficiência desta se encontra numa faixa de 5 a 10%. Alguns materiais envolvendo telúrio de cádmio ou um composto de cobre, índio e selênio, têm sido utilizados em pesquisas laboratoriais. Porém, eficiências em torno de 18% são atingidas em células que apresentaram muitas dificuldades de fabricação. A saída de energia elétrica de um módulo fotovoltaico é dada pela equação (Shakya et al. , 2005)

$$E = \eta_{\text{mód}} \cdot A_T \cdot I_T \quad (4)$$

onde A_T é a área total do módulo, em m^2 , I_T é a radiação solar incidente instantânea por unidade de área e $\eta_{\text{mód}}$ é a eficiência instantânea do módulo, representada pela equação

$$\eta_{\text{mód}} = \eta_r \cdot \eta_{\text{pt}} \cdot \{1 - \beta_t \cdot (T_a - T_r) - \beta_t \cdot I_T \cdot [(\tau \cdot \alpha / (U_L)) \cdot (1 - \eta_r \cdot \eta_{\text{pt}})]\} \quad (5)$$

sendo η_r - eficiência de referência do módulo ou eficiência no máximo ponto de potência numa dada temperatura de referência, dada pela equação $\eta_r = (I_{\text{mp}} \cdot V_{\text{mp}}) / 1000 A_T$, onde I_{mp} e V_{mp} são, respectivamente, a corrente e a tensão elétrica no ponto de potência máxima; η_{pt} - eficiência do controlador de carga, sendo igual a 1 para um controlador perfeito; β_t - coeficiente de temperatura, tendo seu valor, para células de silício, variando numa faixa de 0,004 - 0,006 por °C; T_a - temperatura ambiente; T_r - temperatura de referência do módulo; τ - transmitância de alguma superfície disposta sobre a célula; α - fração da radiação incidente na superfície das células que é absorvida; U_L - coeficiente de perdas. A relação $(\tau \cdot \alpha / (U_L))$ pode ser expressa por meio da temperatura nominal de operação da célula (NOCT), através de

$$(\tau \cdot \alpha / (U_L)) = ((\text{NOCT} - 20) / (800)) \quad (6)$$

Os parâmetros η_{pt} , β_t , T_r , NOCT, A_T , I_{mp} , V_{mp} são fornecidos, para cada tipo, pelos fabricantes.

Tecnologias acerca de uma concentração da energia solar têm sido desenvolvidas. Neste caso, concentradores são utilizados a fim de elevar, consideravelmente, a eficiência e conversão. A saída do conjunto fototransformador será conectado ao eletrolisador, o qual receberá essa energia, que será utilizada para realizar a eletrólise da água. Essa água, antes de ser submetida ao processo de eletrólise, deverá passar por uma unidade dessalinizadora para que impurezas indesejáveis ao processo de obtenção de hidrogênio sejam retiradas, a fim de elevar a eficiência de conversão dos eletrolisadores.

Uma outra fonte renovável de energia é aquela proporcionada pelos movimentos dos ventos. Esses movimentos ocorrem devido à diferença no aquecimento solar terrestre, sendo assim uma forma indireta de energia solar. Turbinas eólicas transformam a energia cinética dos ventos em energia elétrica, que será posteriormente consumida. A potência disponível contida no vento é dada pela equação

$$P = (1/2)\rho \cdot A \cdot V^3 \quad (7)$$

onde ρ é a densidade do ar, A a área da secção transversal de um tubo de corrente no qual o vento escoia numa dada velocidade V (P. Carvalho, 2003). Mas apenas um percentual dessa potência contida nos ventos pode ser extraída por

turbinas eólicas. A relação entre a potência retirada pelas pás de uma turbina e a potência total disponibilizada pelos ventos é chamada coeficiente de potência. O aproveitamento máximo teórico por uma turbina de vento é dada pelo coeficiente de Betz, que possui valor de 59%. Na prática, esse valor ainda não foi atingido. Esta é uma tecnologia que passa por uma evolução bastante considerável em seus equipamentos. Atualmente, já estão trabalhando com turbinas com potência nominal de 5MW. Em consequência do desenvolvimento desta tecnologia, os custos para geração de energia elétrica a partir da fonte primária eólica tem sofrido uma redução bastante considerável. Em algumas regiões que possuem excelentes condições meteorológicas para o devido aproveitamento desta fonte renovável, os custos para produção de energia elétrica equivalem-se aos de outras fontes tradicionais. O grande problema inerente à produção eólica de eletricidade é a sua intermitência. Variações de velocidade intensas podem ocorrer, podendo ocasionar uma fadiga no material que compõe a turbina, principalmente em suas pás. Essa característica intermitente do vento resulta num baixo fator de capacidade de funcionamento dos equipamentos, não atingindo valores além de 40% (Sherif et al., 2005). Em algumas áreas no mundo, a disponibilidade para aproveitamento dessas duas fontes renováveis justifica todos os custos para implantação de um sistema híbrido eólico-solar-hidrogênio como meio de incremento da matriz energética do local e, principalmente, uma opção para redução da emissão na atmosfera de gases que intensificam o efeito estufa. O devido acoplamento dessas tecnologias, juntamente com a produção de hidrogênio, proporcionaria um aumento na disponibilidade de energia utilizável, contribuindo para o desenvolvimento da região.

Uma planta eólico-solar-hidrogênio proporcionaria a produção de hidrogênio eletrolítico a ser utilizado para abastecer o mercado interno do país, como também o excesso poderia ser comercializado com outros países que não possuem uma certa disponibilidade de fontes de energia renováveis. Para devida escolha da região onde será instalada a planta híbrida, é necessária a observação prévia do comportamento de alguns parâmetros meteorológicos ao longo de um determinado período, normalmente um ano. Estes são a velocidade média diária de vento e a irradiação média diária sobre o local. Como o objetivo é a produção de hidrogênio eletrolítico e a sua comercialização, é necessário que o local seja um ponto com proximidades a outros consumidores e que possua uma infra-estrutura portuária adequada para devido escoamento do produto hidrogênio. O sistema de acoplamento entre a turbina de vento, o conjunto de fotocélulas e o eletrolizador deve receber uma atenção especial. Alguns problemas podem decorrer da característica intermitente de funcionamento das turbinas eólicas. Em eletrolizadores alcalinos, na situação de baixos carregamentos na saída de potência da turbina eólica, a razão na qual os gases hidrogênio e oxigênio são produzidos, que é diretamente proporcional ao sinal de entrada de corrente no eletrolizador, pode ser inferior à razão na qual esses gases permeiam por entre o eletrólito, causando uma mistura dos mesmos (Sherif et al., 2005). Como o limite de inflamabilidade do hidrogênio no oxigênio situa-se numa faixa de 4,6-93,9%, então a possibilidade de ocorrência de uma chama dentro do equipamento é bastante considerável. Para que isso não venha a ocorrer, equipamentos de monitoramento de alguns parâmetros são instalados no sistema. Outro problema que poderia ocorrer seria uma queda da eficiência durante o funcionamento do eletrolizador, quando estivesse operando em temperaturas abaixo da nominal.

8 Conclusões

Devido aos elevados preços de mercado dos combustíveis fósseis e às emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera em decorrência de sua queima, a vertente que trata o hidrogênio como o substituto destas fontes energéticas poluentes ganha mais força. O hidrogênio é ambientalmente limpo quando obtido de fontes renováveis de energia. A escolha do uso de turbinas eólicas e células fotovoltaicas justifica-se quando da evolução, principalmente nas últimas décadas, de suas tecnologias. Isto, juntamente com excelentes comportamentos de algumas variáveis meteorológicas, tem proporcionado uma perspectiva imediata em relação a competitividade em muitas regiões. A produção de hidrogênio e sua inserção como um vetor energético a ser utilizado na matriz energética de nosso país contribuiria para um aumento de disponibilidade de energia, resultando num eventual crescimento econômico. A utilização desse sistema híbrido eólico-solar-hidrogênio proporcionaria uma maximização do aproveitamento dos recursos energéticos em nossa região, juntamente com a evolução de um novo produto com caráter de exportação, o hidrogênio. Uma nova cadeia produtiva seria esperada para fabricação de hidrogênio, resultando em novos empregos e novas oportunidades de negócios. Os benefícios anteriormente apresentados, juntamente com a evolução natural das tecnologias em sistemas eólicos, solares e de produção eletrolítica de hidrogênio, faz com que esperemos uma maior atenção dos detentores de tomadas de decisões em relação a esse campo de estudo e investimentos.

Referências

- BARBIR, F. *Review of hydrogen conversion technologies*. Miami: University of Miami, Clean Energy Research Institute, 1999. 15 f. Report.
- BARBIR, F. *Safety issues of hydrogen in vehicles*. West Palm Beach: Energy Partners, 2001. 5 f. Report
- BENEMANN, J. R. Hydrogen production by microalgae. *Journal of Applied Phycology*, New York, v. 12, p. 291-300, 2000.
- BOLTON, J. R. *Solar photoproduction of hydrogen*. Ontario: Hydrogen Program of the International Energy Agency, 1996. 51 p. Subtrack C, Annex 10.
- BRANDÃO, M. O. *Termodinâmica e simulação de sistemas de células a combustível, potencial gerador elétrico para aplicações estacionárias e automotivas*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. 30 p. Prêmio Mercosul 2004 – Jovem Pesquisador.
- DA SILVA, E. P. *Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio*. Campinas, SP: Ed. UNICAMP, 1991. 204 p.
- DILLON A. C. et al. Carbon nanotube materials for hydrogen storage, In: DOE/NREL HYDROGEN PROGRAM REVIEW. 2000. *Proceedings...* Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/28890kkk.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2005.
- DILLON A. C. et al. Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes. *Nature*, London, v. 386, p. 377-379, 1997.
- DOCTOR, R. D.; MOLBURG, J. C. Clean hydrogen from coal with CO₂ capture and sequestration. In: SPERLING, D.; CANNON, J. S. (Ed.). *The hydrogen energy transition: moving toward the post petroleum age in transportation*. Burlington: Elsevier, 2004. p. 51-62.
- FRANK. M. H. T. Petrobrás & a economia do hidrogênio. In: FORUM DE DEBATES AO TEMA “COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS: IMPACTOS NA SOCIEDADE E NA INDÚSTRIA QUÍMICA.” Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Tecnologia, 2005. 1 CD-ROM.
- LOPEZ, R. A. *Célula combustível a hidrogênio*. Rio de Janeiro: Artliber, 2002. 184 p.
- MURRAY, S. *The status of and pathways to a safe, feasible, and sustainable fuel infrastructure for the hydrogen fuel cell vehicle via public policy and codes and standards*. Washington DC: ASME International, 2003. 74 p. (The Hydrogen Hurdle).
- PRINCE-RICHARD, S. *A techno-economic analysis of decentralized electrolytic hydrogen production for fuel cell vehicles*. 1996. 206 f. Thesis, Departament of Mechanical Engineering, Laval University, Laval, 1996.
- RYDÉN, M.; LYNGFELT, A. Using steam reforming to produce hydrogen with carbon dioxide capture by chemical-looping combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, London, v. 31, p. 1271-1283, 2006.
- SHERIF, S. A.; BARBIR, F.; VEZIROGLU, T. N. Wind energy and the hydrogen economy-review of the technology. *Solar Energy*, London, v. 78, p. 647-660, 2005.
- STRÖBEL, R. et al. Hydrogen adsorption on carbon materials. *Journal Power Systems*, London, v. 84, p. 221-224, 1999.
- SWAIN, M. R.; SWAIN, M. N. A comparison of H₂, CH₄, and C₃H₈ fuel leakage in residential settings. *International Journal of Hydrogen Energy*, London, v. 17, p. 807–815, 1992.
- ULLEBERG, O. *Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation and control of solar-hydrogen energy systems*. 1998. 293 f. PhD Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998.
- VEZIROGLU, T. N.; BARBIR, F. *Hydrogen energy technologies*. Vienna: UNIDO, 1998. 122 p.
- YÜZÜGÜLLÜ, E. *Hydrogen production alternatives: resolving disparities and examining the stability of decision making amongst divergent stakeholders*. 2005. 287 f. D.Sc. Dissertation, George Washington University, Washington, D.C., 2005.
- ZÜTTEL, A. Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, Düsseldorf, v. 4, p. 57-72, 2004.

Elissandro Monteiro do Sacramento

Físico graduado pela Universidade Estadual do Ceará, em 2003, eletrotécnico formado no Cefet-Ce, em 1997, mestrando do curso de mestrado em Ciências Físicas Aplicadas pela UECE (Universidade Estadual do Ceará). Atualmente ocupa o posto de professor de Física no ensino médio, atua em atividades de pesquisas na área de energias alternativas, bem como executa trabalhos em nível técnico nas áreas de eletrotécnica e refrigeração.

Lutero Carmo de Lima

Graduou-se em Física no ano de 1974, possui mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade federal de Santa Catarina (1976) e Universidade de São Paulo (1986), respectivamente. Atualmente ocupa o cargo de professor na Universidade Estadual do Ceará, trabalhando também com problemas fundamentais das ciências térmicas, instrumentação e energias alternativas. Publicou dezenas de artigos em revistas e congressos nestes assuntos.

Paulo César Marques de Carvalho

Nascido em Fortaleza em Abril de 1963. Doutor pela Universidade de Paderborn – Alemanha 1993-1997, professor do departamento de Engenharia Elétrica da Universidade federal do Ceará. Pesquisador na área de sistemas de energia, com várias publicações na área de geração fotovoltaica e eólica.